



Modélisation multi-agents de transports collectifs artisanaux : structures émergentes et stratégies individuelles

Léa Wester

► To cite this version:

Léa Wester. Modélisation multi-agents de transports collectifs artisanaux : structures émergentes et stratégies individuelles. SAGEO, Nov 2015, Hammamet, Tunisie. hal-01263536

HAL Id: hal-01263536

<https://hal.science/hal-01263536>

Submitted on 29 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation multi-agents de transports collectifs artisanaux : structures émergentes et stratégies individuelles

Léa Wester

UMR 7300 ESPACE, Aix Marseille Université
25 avenue Robert Schuman, 13100 Aix en Provence, France
lea.wester@laposte.net

RESUME. Les pouvoirs publics de certaines grandes métropoles du Sud n'interviennent pas dans la gestion des transports en commun. En l'absence de centralisation, des solutions alternatives apparaissent. Elles fonctionnent sur la base de l'initiative individuelle. Autrement dit, des individus indépendants mettent en place des offres de transport collectif. Dans le cas de Brazzaville, le système présente une grande stabilité à la fois dans l'espace et le temps. Sa structure repose sur un phénomène d'émergence spatiale lié à la combinaison de stratégies individuelles non concertées. Dans l'objectif de caractériser les processus en jeu, nous proposons d'appréhender ce système par une approche individu centrée, basée sur les théories de l'auto-organisation. Un modèle multi-agents a été construit à partir de données d'enquête. Il permet d'analyser l'impact des stratégies individuelles sur les structures spatiales du système, en lien avec les différentes variables. Les différentes configurations font émerger des structures plus ou moins fragmentées, variées et efficaces. Les relations dynamiques et multiscalaires sont caractérisées par l'identification de seuils.

ABSTRACT. Public authorities of several metropolises in southern countries do not participate in the management of the collective transports. In this context of lack of centralization, alternative solutions appear. They are based on individual initiatives. In other words, independent individuals develop offers of collective transport. In the case of Brazzaville, the system presents a huge stability through time and space. Its structure rest upon a spatial emergence phenomenon linked to the combination of non-concerted individual strategies. With the aim of characterizing the processes at stake, we propose to apprehend this system with an individual-based approach, inspired from self-organization theories. An agent-based model was built on surveys' data. It allows analyzing the impacts of individual strategies on spatial structures of the system, coupled with several variables. The different configurations lead to the emergence of more or less fragmented, diversified and efficient structures. Multi-scalar and dynamic relations are characterized by the identification of thresholds.

MOTS-CLES : transports collectifs artisanaux, systèmes multi-agents, auto-organisation

KEYWORDS: artisanal collective transports, developing cities, self-organization, agent-based models

1. Les transports collectifs artisanaux : gestion individuelle de la mobilité collective

Les pouvoirs publics de certaines grandes métropoles du Sud n'interviennent pas dans la gestion des transports en commun. Dans ce contexte, des solutions alternatives apparaissent. La mobilité quotidienne de plusieurs millions de citoyens repose aujourd'hui sur des systèmes entièrement privés et fragmentés (World Bank, 2002). De Nairobi (Graeff, 2009) à Santiago (Figueroa, 2005), ces transports collectifs sont présents sur plusieurs continents. En l'absence d'autorité centralisatrice, ils fonctionnent sur la base de l'initiative individuelle et prennent des formes multiples (Cervero, 2000). Malgré le petit nombre d'études générales sur le sujet, certains traits communs ont été définis et permettent de mieux cerner les caractéristiques de ces systèmes de transport.

Ce secteur d'activité est la plupart du temps composé de micro-entreprises « artisanales », dans le sens où elles se composent d'une seule personne ou d'un petit groupe (Godard et al., 1994). Autrement dit, des individus autonomes et indépendants mettent en place des offres de transport collectif. Elles reposent, de fait, sur une gestion décentralisée (Wilkinson et al. 2011), puisqu'elles ne sont ni planifiées, ni régulées. Ces systèmes sont difficilement lisibles étant donné qu'ils reposent sur une information non concertée et non regroupée, tant pour les usagers que pour les transporteurs.

Au-delà du manque de lisibilité important, les transports artisanaux fonctionnent : l'activité est rentable et pourvoyeuse d'emplois (Godard, 2002). Cependant, la notion de service public est complètement absente de l'organisation du secteur. Dans ce cas, l'efficacité de la desserte est une notion plus économique que sociale. Du point de vue des usagers, l'accessibilité est inégale. Dans le cas de Lima par exemple, les populations les plus pauvres et les zones très excentrées sont les moins bien desservies (Wester, 2014).

Dans une perspective de développement, les pouvoirs publics tentent de mettre en place des systèmes centralisés, notamment à travers des systèmes en site propre, appelés bus rapid transit (Gil-Beuf, 2007; Mobereola, 2009) ou le lancement de transports publics (Paquette, 2010). Ces systèmes restent sérieusement concurrencés par les transports artisanaux (Lomme, 2004). Les transports artisanaux ont des qualités qui sont difficiles à reproduire avec un système centralisé (Salazar Ferro, 2014). Ils permettent par exemple une desserte souple à la fois dans l'espace et dans le temps. Ils s'imposent ainsi comme un élément important pour de nouveaux systèmes de transports en commun (Godard, 2008). En tant que constructions endogènes, ils constituent un modèle de transport collectif adapté à la réalité urbaine. Une telle source d'innovation mérite une analyse plus approfondie (Amar, 2004).

Nous avons étudié la mobilité urbaine de Brazzaville, capitale de la République du Congo. Dans un contexte de choix modal restreint, la seule alternative motorisée au véhicule personnel est le transport collectif artisanal. Le système émergent montre une grande stabilité, à la fois dans l'espace et le temps.

Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes. Proceedings of the Spatial Analysis and GEomatics conference, SAGEO 2015.

Dans une démarche explicative, nous proposons une approche de modélisation individu centrée spatialisée, à travers la construction d'un système multi-agent. L'objectif est de caractériser les processus qui sous tendent les structures et les dynamiques spatiales de ce système. Afin d'identifier des variables structurantes, nous testons l'impact de différentes configurations sur les structures spatiales émergentes.

2. Le contexte Brazzavillois des transports collectifs

Brazzaville est la capitale de la République du Congo. Fondée au XIX^e par les colons français, elle a une structure urbaine particulière : les densités de population sont plus importantes en périphérie qu'au centre de l'agglomération. Cette répartition trouve son origine dans la planification coloniale de la ville qui réservait le centre aux colons et attribuait une parcelle à chaque famille en périphérie (Balandier, 1955). Aujourd'hui, les périphéries ont conservé une fonction principalement résidentielle. Le centre de l'agglomération est plus aéré et concentre la majorité des activités administratives et économiques. Il est aussi bien mieux équipé : les infrastructures y sont plus développées (Ziavoula, 2006).

Ce cadre urbain génère des déplacements quotidiens polarisés sur la partie centrale de l'agglomération. Le taux de motorisation des ménages est entre 10 et 20% dans les villes africaines (Diaz Olvera et al. 2010). Brazzaville ne fait certainement pas exception. En l'absence de système de transport en commun centralisé, la mobilité quotidienne des 1,2 millions d'habitants de la capitale pose question. Pour comprendre le fonctionnement de ce système nous avons mis en place plusieurs enquêtes (Perez, 2009; Perez, 2010; Audard et al., 2012; Wester, 2013).

Le système de transport collectif brazzavillois repose uniquement sur l'initiative individuelle. Chaque véhicule est occupé par un crieur et un chauffeur que nous appelons « opérateurs ». Ils sont au cœur du système puisque ce sont les seuls à être au contact de la demande (Schéma 1). Ils doivent payer la location de leur véhicule et les différentes taxes et droits de circulations. Les pouvoirs publics contrôlent uniquement les papiers des chauffeurs grâce à des agents de contrôle. Il n'y a aucune centralisation technique : c'est-à-dire que personne ne coordonne les itinéraires ou les fréquences de circulation des bus.

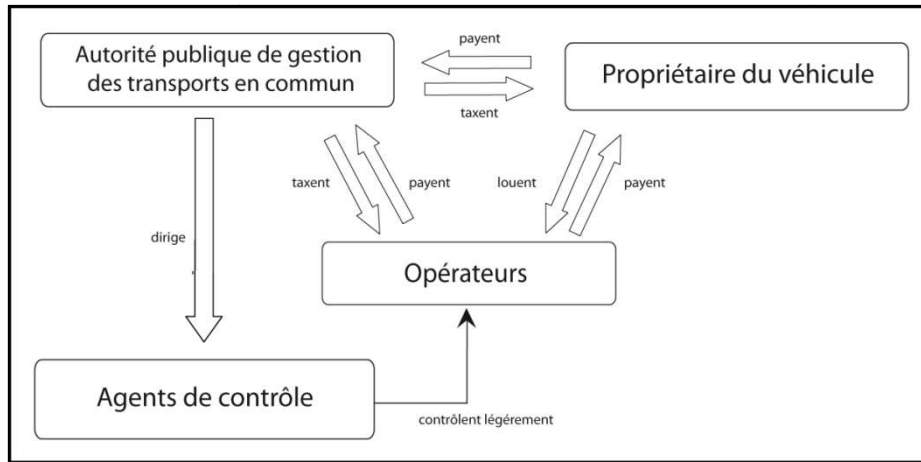
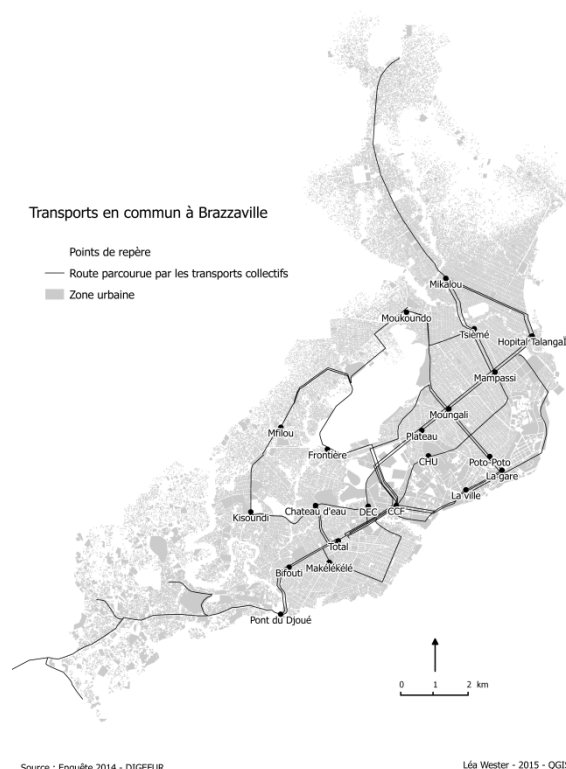


Schéma 1 : Les acteurs de l'offre de transport collectif (Léa Wester – 2015)

Cette absence de centralisation technique laisse les opérateurs libres de choisir leurs itinéraires et leurs fréquences de circulation. Afin de dégager suffisamment de bénéfices pour payer leurs frais et leurs salaires, ils mettent en place des stratégies particulières pour être le plus rentable possible.

Ces stratégies reposent sur une construction progressive des itinéraires. En arrivant à un arrêt de bus, le crieur annonce une destination et jauge la réaction des usagers qui attendent. Il recommence son annonce jusqu'à trouver la destination la plus rentable. Autrement dit, il cherche la destination la plus demandée mais également celle qui sera la moins embouteillée et si possible à une distance raisonnable. Le crieur recommence ce processus à chaque fois que son bus se vide.

Pour la construction de ces itinéraires, les opérateurs ont à leur disposition un réseau fortement contraints par l'état de la voirie. La quasi-totalité des routes goudronnées est parcourue par des transports en commun. Les routes parcourues par les transports collectifs sont cependant présentes sur la totalité de la zone urbanisée (Carte 1). Le réseau est structuré par des points de repères qui permettent aux opérateurs et aux usagers de communiquer. Ils constituent les principaux arrêts de la ville.



Carte 1 : Réseau utilisé par les transports en commun Brazzavillois

3. Du terrain à la modélisation, fondements théoriques : auto-organisation, approche individu centrée, système multi-agents

Comme tout système anthropique, les transports collectifs ont un fort degré de complexité (Chardin, 1955). La complexité est caractérisée par la variété des éléments et des interactions (Rosnay, 1975). Elle constitue un défi méthodologique : les systèmes complexes sont difficiles à appréhender et appellent une réflexion systémique (Morin 1990). Celle-ci doit prendre en compte les éléments du système et leurs relations à différentes échelles organisationnelles et spatiales (Le Moigne, 2005). Dans ce cadre, notre travail présente une optique explicative. Il s'agit de proposer une description la plus fidèle possible des phénomènes observés afin de les comprendre et de les analyser (Benkirane, 2002).

Nous tentons de comprendre quels sont les processus liés aux transports collectifs artisanaux, en caractérisant notamment la relation entre mobilité collective et initiative individuelle. Dans ses déplacements comme dans ses autres actions, l'individu est à la fois produit et producteur de la société (Dupuy, 2004). Il construit

Copyright © by the paper's authors. Copying permitted for private and academic purposes. Proceedings of the Spatial Analysis and GEomatics conference, SAGEO 2015.

ses choix en fonction de ses besoins et de l'état du système dans lequel il s'insère. Ce positionnement méthodologique implique de mettre au centre de l'analyse : l'individu, ses stratégies et ses relations au groupe. Dans le cas de la mobilité, il s'agit de considérer l'individu et la société dans leurs pratiques spatiales (Bailly, 1995). La spatialisation des phénomènes implique plusieurs échelles à la fois organisationnelles et spatiales : de l'individuel au groupe, du micro au macro.

Dans le cas de Brazzaville, la desserte en transport collectif présente une structure stable. Celle-ci repose sur un phénomène d'émergence spatiale lié à la combinaison de stratégies individuelles non concertées. La non-centralisation et le caractère multiscalaire du fonctionnement du système nous incite à utiliser les théories de l'auto-organisation (Pumain, 2007). Il s'agit en effet d'un système auto-organisé puisque l'organisation ne repose pas sur une forme de concertation ou de coordination centralisée des individus (Daudé, 2004). Chacun construit ses stratégies en fonction d'une connaissance limitée de l'état global du système. C'est à partir des éléments et de leurs interactions que l'organisation du système émerge. L'adaptation des stratégies individuelles entraîne celle du groupe et sous-tend les processus d'auto-organisation du système (Donnadieu, Karsky, 2002).

Afin d'envisager du mieux possible la coévolution des stratégies individuelles et des structures émergentes, nous proposons une approche individu centrée (Daudé 2005). Autrement dit, le point de départ de l'analyse correspond aux particules élémentaires du système, les individus dans notre cas.

Cela se traduit dans notre démarche de modélisation. L'objectif est de donner aux agents une capacité d'adaptation suffisante pour qu'ils ne répondent pas à des typologies de stratégies. Leurs comportements doivent résulter d'un dialogue permanent avec leur environnement (Bonnefoy, 2005). Il s'agit d'étudier des processus *bottom up* en se concentrant sur les éléments de base du système, tout en prenant en compte la manière dont le niveau macro rétroagit sur ces individus au niveau local. Nos agents ont des logiques de fonctionnement communes mais chacun est différent par ses expériences et sa perception de son environnement.

4. Construction du modèle multi-agents de l'offre de transports en commun

Dans le cas du modèle des transports artisanaux brazzavillois, nous utilisons un système multi-agents. Il s'agit de programmer des agents dans un environnement défini. Ces agents ont des interactions entre eux et avec leur environnement en fonction de règles simples définies par le modélisateur (Ferber, 1997).

Nous avons modélisé le système à partir d'un certain nombre de données issues du terrain¹. Les agents évoluent dans un environnement (Figure 1) qui correspond au

¹Une première série d'entretiens semi-directifs en 2013 a permis de définir les stratégies des opérateurs. La demande a été implémentée à partir d'une enquête origine / destination effectuée en mai 2014. Elle correspond à une estimation de la demande entre 6h et 18h un jour de semaine.

réseau (Carte 1). Il s'agit d'un graphe dont les nœuds sont constitués par les principaux arrêts de bus et les liens correspondent aux routes qui peuvent être parcourues par les opérateurs. Chaque arrêt de bus peut accueillir un certain nombre de bus². Chaque lien a un temps de parcours et un prix proportionnels à sa longueur³. Les usagers apparaissent heure par heure à leur arrêt de bus d'origine avec un arrêt de destination.

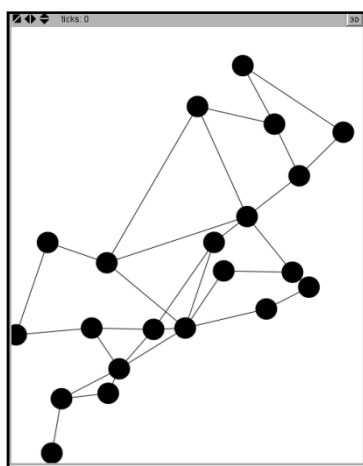


Figure 1 : Le graphe-environnement du SMA

De manière globale, les agents-usagers cherchent un bus pour les conduire à leur destination et les agents-bus cherchent à effectuer les déplacements les plus rentables possibles. Ils construisent leurs itinéraires en fonction de la demande selon une stratégie basée sur l'apprentissage. Les structures et les dynamiques de la desserte émergent à partir de ces stratégies. Les agents bus agissent en ayant pour objectif de maximiser leur profit en s'adaptant aux informations qu'ils peuvent avoir sur leur environnement. Cette information est limitée et propre à chaque agent. Chaque déplacement donne lieu à un bilan qui permet aux agents de donner une note à l'arrêt desservi.

²La capacité de la totalité des arrêts est de 119 bus. Sachant que certains ne comptent que deux places et d'autres une vingtaine. Un travail de terrain en 2014 nous a permis de collecter les données concernant les arrêts de bus. Leur capacité est ici recalculée de façon à rester cohérente avec la demande implémentée.

³Les liens correspondent aux routes goudronnées. Leur coût et leur temps de parcours sont fixés en fonction du prix de l'essence au Congo en 2014 (500 FCFA / Litre), de la consommation moyenne d'un véhicule de type hiace de la fin des années 1990 ou début 2000 (10 Litres / 100km) et d'une vitesse de circulation fixe (40 km/h).

Les interactions entre les agents créent des structures qui influent sur la rentabilité des arrêts : saturation de certaines zones, demande insuffisante ... Les agents-bus font constamment dialoguer la situation de l'environnement et leur mémoire pour construire leurs déplacements. Le système est bien auto-organisé puisque l'émergence de la desserte repose sur l'adaptation des stratégies des agents grâce aux informations limitées dont ils disposent.

La construction par chaque agent d'une représentation de son environnement est basée sur son expérience à travers deux axes principaux : le prix du kilomètre parcouru et le prix du pas de temps écoulé. La rentabilité associée aux zones à desservir confronte à la fois les recettes générées par les usagers desservis et les coûts associés à la distance, aux temps d'attente et de parcours. Cette démarche basée sur une fonction d'utilité permet aux agents-bus de chercher la meilleure rentabilité. Dans le cas où aucun déplacement n'est rentable, ils effectuent celui où ils perdent le moins d'argent. Cette configuration permet de rester dans un processus de choix réaliste : les déplacements ne sont pas toujours exclusivement rentables au cours d'une journée. Le diagramme d'activité suivant représente l'enchaînement des procédures (Schéma 2). Ces processus se déroulent dans un contexte temporel et spatial défini par le coût du kilomètre parcouru³ et celui de la minute écoulée⁴.

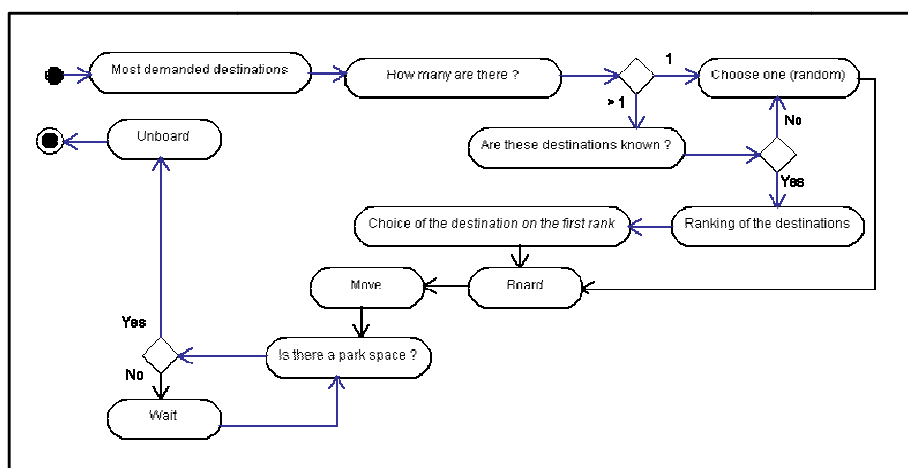


Schéma 1 : Diagramme d'activité es agents-bus (Léa Wester – 2015)⁵

⁴Les taxes payées par les opérateurs ont été estimées sur le terrain et ramenées à la minute. Ainsi les temps de parcours entre les arrêts et la saturation des arrêts ont une incidence sur la rentabilité pour nos agents.

⁵En arrivant à un arrêt, l'agent-bus liste les destinations les plus demandées. Il utilise ensuite sa mémoire des précédents déplacements pour choisir celle qui a été la plus rentable par le passé. Il définit ensuite l'itinéraire à parcourir et embarque les usagers intéressés. Quand le

Une série de tests a été effectuée afin de vérifier la cohérence du modèle. La validation du modèle dépend des hypothèses testées (Amblard *et al.*, 2006). Dans notre cas, il s'agit de s'assurer de la vraisemblance des processus et des structures spatiales émergents. Nous entendons proposer des « explications satisfaisante » (Popper, 2009) en soulignant l'existence d'écarts entre la complexité du système observé et la simplification que constitue notre modèle.

La confrontation des sorties du modèle avec les des données d'enquête permet de s'assurer de la cohérence externe du modèle. En considérant la configuration la plus proche de la réalité⁶, nous avons confronté les capitaux accumulés par nos agents avec les revenus des chauffeurs brazzavillois (Landa, 2014). Nos simulations produisent des résultats équivalents à moins de 10% près⁷. Nous avons confronté la répartition des fréquentations dans notre modèle avec des comptages de fréquences⁸. Les principaux pôles restent les mêmes : les arrêts de l'avenue de l'OUA et du rond point MOUNGALI (voir Carte 1).

5. Offre, Demande, Réseau : efficacité et structure spatiales émergentes

Afin de définir les variables structurantes des transports collectifs artisanaux, nous testons plusieurs types de variables. Nous étudions ici l'augmentation du nombre de bus. Les aspects économiques et spatiaux du réseau restent fixes. Seule la variable étudiée varie. Un tel choix nous permet de considérer l'impact des relations entre l'offre, la demande et le réseau. En faisant varier le nombre de bus nous jouons à la fois sur le nombre d'usagers qui pourraient être embarqués et sur la saturation du réseau.

Ainsi, les simulations s'effectuent dans un contexte où le système peut accueillir 119 bus sur la totalité de ses arrêts et génère 10 660 usagers au total sur la journée (Tableau 1). Pour l'aspect économique, le kilomètre parcouru et le pas-de-temps écoulé coûtent 50 CFA chacun. Chaque passager transporté rapporte 150 CFA. Afin de ne pas avoir de biais induit par la situation initiale, les agents bus sont répartis au départ de manière homogène sur le réseau.

bus a embarqué suffisamment de passagers, il se rend à l'arrêt suivant. Une fois arrivé, il doit attendre qu'une place se libère pour pouvoir débarquer ses usagers et recommencer le processus.

⁶Les proportions réelles se situent aux alentours de 1000 véhicules pour 500 000 voyages effectués chaque jour. Nous pouvons donc considérer nos simulations avec 21 agents-bus pour 10 660 agents-usagers (équivalents à 1 voyage) comme la configuration la plus proche des proportions réelles (à 1,5% près).

⁷(Landa, 2014) estime que les minibus génèrent en moyenne 40 000 FCFA de recette chaque jour. Nos simulations produisent des résultats moyens aux alentours de 35 550 en moyenne. L'ordre de grandeur reste donc le même.

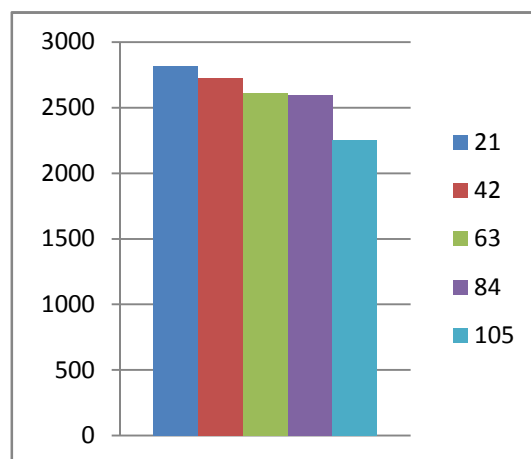
⁸Comptages effectués lors de la mission de 2014, complétés avec ceux de (Landa, 2014).

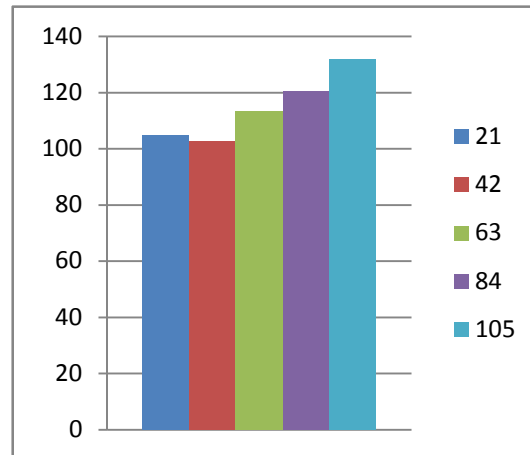
Tableau 1 : Synthèse des situations initiales

Nombre de bus	Places de parking disponibles par bus sur l'ensemble des arrêts	Nombre d'usagers potentiels par bus pour la totalité de la simulation
21	6	508
42	3	254
63	2	169
84	< 2	127
105	< 2	102

Les simulations effectuées montrent que l'augmentation du nombre de bus a un impact sur l'efficacité du système. En termes de nombres d'usagers desservis à la fin de la simulation (Graphiques 1), la configuration où le nombre d'usagers desservis est le plus important compte 21 bus. L'augmentation du nombre de bus n'a pas pour effet d'augmenter le nombre d'usagers desservis comme on aurait pu le penser.

De la même manière, les temps d'attente moyens des usagers desservis dans nos simulations sont moins importants pour les configurations avec 21 et 42 bus (Graphique 2). L'augmentation du nombre de bus fait augmenter les temps d'attente. La configuration les configurations les plus efficaces semblent donc être celles qui comptent 21 et 42 bus.

*Graphique 1 : Nombre moyen d'usagers desservis – Variation usagers / bus*



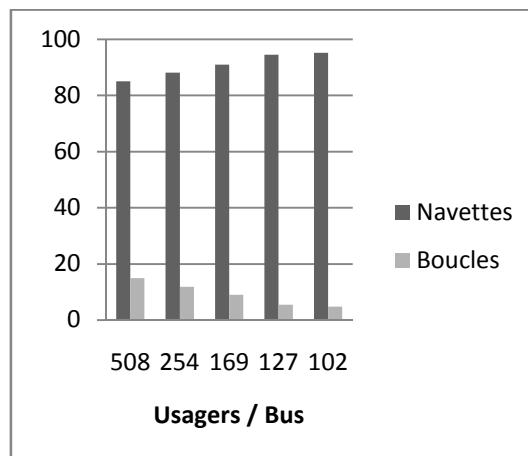
Graphique 2 : Moyenne des temps d'attente – Variation du rapport usagers / bus

Ce phénomène est en partie expliqué par la saturation du réseau. L'augmentation du nombre de véhicules crée des embouteillages. D'autre part, le déséquilibre entre le nombre de véhicules et la demande ralentit la circulation : les bus ne circulent que s'ils ont un nombre suffisant de passagers. L'impératif de rentabilité les oblige à attendre l'arrivée d'utilisateurs supplémentaires.

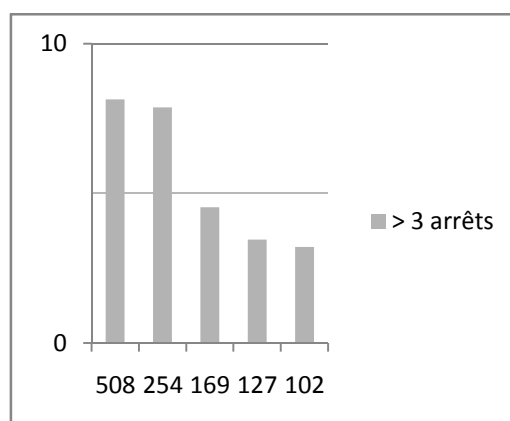
En termes de structures spatiales, l'augmentation du nombre de bus fait diminuer la variété des structures observées (Graphique 3). Le système de transport émergent est composé de plus de 10% d'itinéraires en forme de boucle dans les configurations à 21 et 42 bus. Les autres configurations voient augmenter le nombre de navettes au-delà des 90%. Les configurations les plus efficaces en termes de nombre d'utilisateurs desservis et de temps d'attente sont donc celles où les structures spatiales des itinéraires sont les plus variées.

D'autre part, l'augmentation du nombre de bus a pour conséquence de faire émerger des structures plus fragmentées. Ainsi les itinéraires qui comportent des structures de plus de 3 arrêts sont moins fréquents quand il y a un grand nombre de véhicules sur le réseau (Graphique 4).

L'efficacité du système semble donc liée aux structures spatiales de la desserte. L'émergence de formes plus fragmentées et moins variées correspond aux simulations où le nombre d'utilisateurs desservis est le moins important.

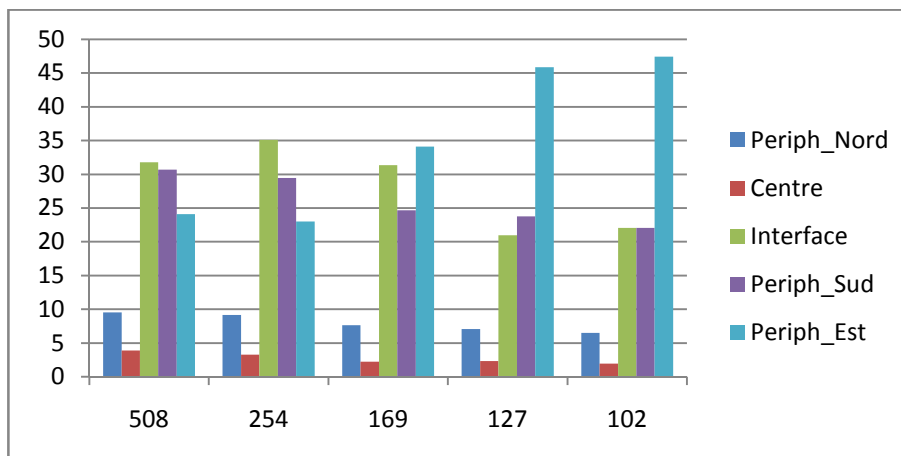


Graphique 3 : Structures de itinéraires – Variation du rapport usagers / bus



Graphique 4 : Pourcentage des structures de plus de 3 arrêts – Variation du rapport usagers / bus

En parallèle, l'augmentation du nombre de bus entraîne une baisse de la fréquentation de certaines zones au profit d'autres (Graphique 5). La périphérie Nord est desservie plus souvent, au détriment de la périphérie Sud et des arrêts qui servent d'interface entre les différentes zones. Ces deux dernières zones sont constituées d'arrêts plus petits et/ou très fréquentés du fait de leur position sur le réseau. Ils sont plus facilement saturés par les bus en attente d'embarquer des passagers. Les fréquentations les plus réparties entre les zones correspondent aux configurations les plus efficaces.



Graphique 5 : Répartition des déplacements des agents-bus – Variation du rapport usagers / bus

Ainsi, la variation du rapport entre le nombre de bus, le nombre d'usagers et la capacité du réseau a des conséquences sur la forme, la répartition et l'efficacité des structures spatiales émergentes. Nos simulations permettent de considérer qu'en dessous de 254 usagers et de 3 places disponibles par bus, le système est moins performant et les structures plus fragmentées et polarisées. Ces seuils ne doivent donc pas être dépassés pour avoir un système qui fonctionne de manière fluide.

A Brazzaville, des données fiables concernant le nombre de bus en circulation sont assez difficiles à obtenir. En croisant les différentes sources, on estime qu'il y a un bus en circulation pour 500 usagers et 6 places disponibles sur le réseau d'arrêts⁹. Il semblerait donc que le système observé tende vers la meilleure configuration.

Conclusion et perspectives

L'approche individu centrée est particulièrement adaptée à l'étude des transports collectifs artisanaux. Elle permet de mettre les stratégies et interactions locales au centre du modèle, tout en conservant les interrelations avec l'environnement et les structures émergentes. Une telle démarche de modélisation reste basée sur les théories de l'auto-organisation, notamment à travers un accès limité des agents à l'information.

⁹Les estimations varient entre les services nationaux qui s'occupent des immatriculations et les services municipaux qui perçoivent des droits de circulation des transports collectifs. Nous avons effectué un comptage sur photo-satellite pour avoir des données plus précises.

Le modèle ainsi construit met en évidence un premier groupe de variables structurantes. Le rapport entre le nombre de bus, le nombre de places disponibles et le nombre d'usagers par bus joue un rôle important dans le système. La configuration la plus efficace est liée à des structures et des dynamiques particulières. En effet, cette desserte repose sur des structures spatiales mixtes en termes de répartition et de forme. Celle-ci est permise par un certain équilibre entre l'offre, la demande et les contraintes physiques du réseau.

Afin d'étudier les autres variables structurantes, les prochaines étapes de cette recherche s'intéresseront aux variations des paramètres économiques. La modification du prix du kilomètre devrait avoir une influence sur la forme des structures observées, tout comme celle du prix du pas-de-temps. Ainsi, en faisant l'hypothèse d'une augmentation des prix de l'essence ou des taxes de circulation, nous pourrions voir quels impacts structurels auraient ces changements en tenant compte des stratégies utilisées par nos agents-bus. Cette analyse portera sur l'impact des relations entre le prix du kilomètre, celui du temps et du ticket sur les structures et dynamiques du système.

Nous proposons ensuite de comparer ces stratégies de gestion des itinéraires à des stratégies de gestion du temps, observées à Lima (Wester, 2012). Les itinéraires des bus liméniens restent fixes. Les fréquences sont adaptées par les opérateurs.

A plus long terme, cette méthode d'analyse des transports collectifs artisanaux a pour objectif d'analyser la manière dont ces stratégies s'adaptent à différents contextes urbains.

Bibliographie

- Amar, Georges. (2004). *Mobilités urbaines. Eloge de la diversité et devoir d'invention*. Paris: Edition de l'aube.
- Amblard, F., J. Rouchier, et P. Bommel. (2006). « Evaluation et validation de modèles multi-agents ». In *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, 103-140. Hermès. http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=534288.
- Audard, Frédéric, Joan Perez, Léa Wester, et Alexandre Grondeau. (2012). « Système de transport en commun et auto-organisation. Le cas de Brazzaville. » In , 18. Addis Abeba.
- Bailly, Antoine. (1995). *Encyclopédie de géographie*. Economica.
- Balandier, Georges. (1955). *Sociologie des Brazzavilles noires*. Armand Colin. Paris.
- Benkirane, Réda. (2002). *La Complexité, vertiges et promesses : 18 histoires de sciences d'aujourd'hui*. Paris: Editions le Pommier.
- Bonnefoy, Jean Luc. (2005). « Etude de géographie théorique et expérimentale ». Habilitation à diriger des recherches, Aix en Provence: Université de Provence.
- Cervero, Robert. (2000). *Informal Transport in the Developing World*. UN-HABITAT.

- Chardin, Pierre Teilhard de. (1955). *Oeuvres: Le phénomène humain*. Éditions du Seuil.
- « Cities on the Move: A World Bank Urban Transport Strategy Review. » (2002). Washington: World Bank.
- Daudé, Eric. (2004). « Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion ». *Cybergeo: European Journal of Geography*, février. doi:10.4000/cybergeo.3835.
- Diaz Olvera, Lourdes, Didier Plat, Pascal Pochet, et Maïdadi Sahabana. (2010). « Entre contraintes et innovation: évolutions de la mobilité quotidienne dans les villes d'Afrique subsaharienne ». *Espace populations sociétés. Space populations societies*, n° 2010/2-3 (décembre): 337-448. doi:10.4000/eps.4206.
- Dupuy, Jean-Pierre. (2004). « Vers l'unité des sciences sociales autour de l'individualisme méthodologique complexe ». *Revue du MAUSS* 24 (2): 310-28. doi:10.3917/rdm.024.0310.
- Ferber, Jacques. (1997). *LES SYSTEMES MULTI-AGENTS. Vers une intelligence collective*. Paris: Dunod.
- Figuerola, Oscar. (2005). *Four decades of changing transport policy in Santiago, Chile*. Santiago: Research in Transport Economics.
- Gil-Beuf, Alice. (2007). « Ville durable et transport collectif: le Transmilenio à Bogotá ». *Annales de géographie* 657: 533-47. doi:10.3917/ag.657.0533.
- Godard, Xavier. (2002). *Les transports et la ville en Afrique au sud du Sahara: le temps de la débrouille et du désordre inventif*. Paris: KARTHALA Editions.
- Godard, Xavier, et Collectif. (1994). *Les transports dans les villes du Sud. La recherche de solutions durables*. Economie et développement. Paris: Karthala.
- Graeff, J. (2009). « The organization and future of the matatu industry in Nairobi, Kenya. » New York: Columbia.
- Landa, André Wilfried. (2014). « Le transport en commun à Brazzaville: organisation de l'espace et effets socio-économiques ». Brazzaville: Université Marien Ngouabi.
- Le Moigne, Jean Louis. (2005). *Formalisme de la modélisation systémique*
- Lomme, Roland. (2004). « La réforme des transports publics urbains à l'épreuve de l'intégration du secteur informel ». *Afrique contemporaine* 210: 79. doi:10.3917/afco.210.0079.
- Mobereola, Dayo. (2009). « Premier bus à haut niveau de service en Afrique. Le BRT-lite de Lagos ». 9. Lagos: SSATP.
- Morin, Edgar. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. ESF.
- Paquette, Catherine. (2010). « Mobilité quotidienne et accès à la ville des ménages périurbains dans l'agglomération de Mexico. Une lecture des liens entre pauvreté et mobilité ». *Tiers Monde* 201: 157. doi:10.3917/rtm.201.0157.
- Perez, Joan. (2009). « Système de transports en commun et auto-organisation à Brazzaville ». Aix en Provence: Université de Provence.

- Popper, Karl Raimund. (2009). *La connaissance objective: une approche évolutionniste*. Flammarion.
- Pumain, Denise. (2007). « Une approche de la complexité en géographie ». Édité par François Durand-Dastès. *Géocarrefour*, Les références des géographes, 78 (1): 25-31.
- Rosnay, Joël de. (1975). *Le macroscope: vers une vision globale*. Éditions du Seuil.
- Salazar Ferro, Pablo. (2014). « Le transport collectif artisanal: une composante essentielle dans un système dual ». CODATU - AFD. <http://www.codatu.org/bibliotheque/doc/le-transport-collectif-artisanal-une-composante-essentielle-dans-un-systeme-dual/>.
- Wester, Léa. (2012). « L'auto-organisation des transports en commun à Lima ». Aix en: Université d'Aix Marseille 1.
- Wilkinson, P, A Golub, R Behrens, Pablo Salazar Ferro, et H Schalekamp. (2011). « Transformation of Urban Public Transport Systems in the Global South ». In *International Handbook of Urban Policy, Volume 3*, H. S. Geyer, 3:30.
- Ziavoula, Robert Edmond. (2006). *Brazzaville, une ville à reconstruire*. KARTHALA Editions.